

## Секция ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

*О. А. Барабанова, С. В. Набатчиков*

МАТИ – Российский государственный технологический университет  
им. К.Э. Циолковского,  
г. Москва,

*С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков, А. А. Гусаков*  
Санкт-Петербургский государственный политехнический  
*itc-mati@mail.ru, serg.sapozhnikov@mail.ru*

### НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Измерение теплового потока (теплометрия) невозможно без соответствующих первичных преобразователей – датчиков. В настоящей статье рассматриваются слоистые композиционные анизотропные материалы, свойства которых позволяют использовать их в роли датчиков теплового потока.

*Ключевые слова:* слоистые композиционные материалы, диффузионная сварка, металл – металл, металл – диэлектрик, термоЭДС, вольт-ваттная чувствительность, градиентные датчики теплового потока.

Heat flux measurement is impossible without sensors. In the present research the sliced anisotropic composites are considered. The properties of said materials allows one to use them for gradient heat flux sensors.

*Keywords:* sliced composite materials, diffusion welding, metal-metal, thermopower, volt-watt sensitivity, gradient heat flux sensors.

Постоянно растущая потребность в новых конструкционных материалах, обладающих сложным комплексом эксплуатационных и технологических свойств, вызывает необходимость системного подхода к проектированию композиционных материалов и созданию технологий их производства.

В данной работе приведены исследования, посвященные разработке слоистых композиционных материалов (СКМ) для создания градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) способом диффузионной сварки (ДС).

Подавляющее большинство разработок, связанных с определением местных тепловых потоков на поверхности теплообмена при температурах 500 К и выше, получены путем пересчета данных теплометрии, что требует вводить эмпирические коэффициенты, использовать умозритель

ные модели и т. д., что приводит к методическим погрешностям, оценить которые удастся далеко не всегда. Кроме того, практически исключена возможность фиксировать, обрабатывать и анализировать пульсации тепловых потоков, имеющие первостепенное значение при исследовании обтекания тел потоками газа, при изучении сложного теплообмена и т. д. Градиентная теплотметрия лишена этих недостатков, поэтому является одним из лучших способов определения тепловых потоков.

Существенными преимуществами обладают градиентные датчики теплового потока (ГДТП), выполненные из материалов с анизотропией тепло-, электропроводности и коэффициента термоЭДС. До настоящего времени градиентные датчики теплового потока ГДТП изготавливались, в основном, из монокристаллического висмута чистоты 0,9999. Вольт-ваттная чувствительность датчиков составляет 5...50 мВ/Вт, что ставит их выше большинства отечественных и зарубежных аналогов, однако ГДТП из висмута работоспособны лишь до точки плавления висмута (541 К) [1]. Идея создания высокотемпературных градиентных датчиков, впервые предложенная Л. Гайлингом в 1947 г., до последнего времени оставалась нереализованной [2, 3].

Слоистые композиционные материалы используются в основном там, где возможности традиционных материалов исчерпали себя. Их изготавливают под конкретную задачу, зная которую разработчик должен сформулировать определенные требования для конечного продукта и технологического процесса его изготовления: геометрические характеристики слоев; схема компоновки слоев; физико-механические свойства и структура композиции; прочность соединения слоев.

Физико-механические свойства и схема компоновки слоев определяются условиями эксплуатации изделия. Однако организация прочного соединения компонентов является основной задачей технологии получения композиционных материалов. В первую очередь прочность соединения слоев определяется соединяемыми материалами.

Именно сбалансированный подход к назначению требований, отражающий экономическую целесообразность с достаточной функциональностью, является основой создания СКМ.

При создании высокотемпературных ГДТП было предложено использовать металлические СКМ. В качестве основных требований к СКМ были выдвинуты следующие положения:

1. СКМ должен обладать анизотропией теплопроводности в двух взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. металлы композиции должны значительно различаться по теплопроводности.
2. Компоненты СКМ должны в зоне соединения образовывать твердые растворы, позволяющие получить термоЭДС достаточной мощности.
3. Рабочая температура СКМ до  $T = 1300$  К.

4. Компоненты СКМ должны обладать химической стойкостью к различным средам, что позволит расширить область использования датчика.

5. Способ соединения должен обеспечить сохранение геометрии и свойств компонентов СКМ, а также прочность достаточную для вырезания элементной базы датчика.

В результате проведенных исследований опробованы различные пары материалов как компактных, так и пористых. В процессе диффузионной сварки получали многослойный анизотропный брусок. После охлаждения его разрезали на пластины, расположенные под углом  $20...45^\circ$  к рабочим плоскостям, а затем присоединяли выводы. Вольт-ваттная чувствительность наиболее перспективных пар и градиентных датчиков теплового потока на их основе приведена в табл. 1.

Таблица 1

Вольт-ваттная чувствительность ГДТП при температуре около 300 К

Композиция	Чувствительность, мВ/Вт
никель + сталь 12Х18Н9Т	0,40
хромель + алюмель	0,35

Фрагмент микрофотографии СКМ представлен на рис. 1.

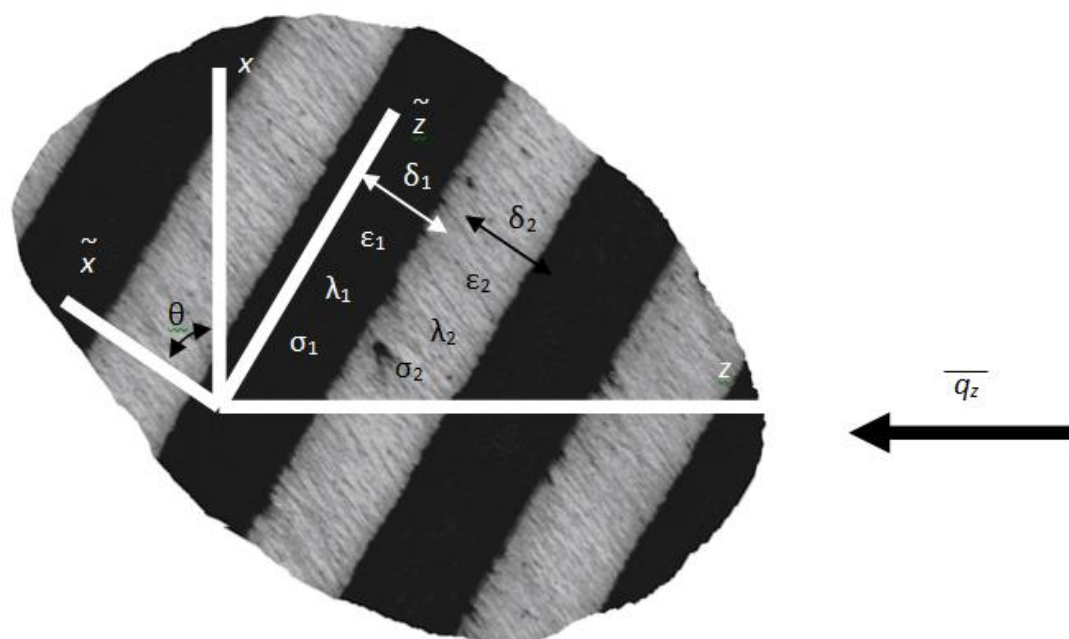


Рис. 1. СКМ, используемый для создания ГДТП

Квазикристаллографические оси слоистой среды  $\tilde{x}$  и  $\tilde{z}$  повернуты относительно «лабораторных» осей  $x$  и  $z$  и на угол  $\theta$ ; вектор внешнего теплового потока  $q_z$  был направлен вдоль оси  $z$ .

На рис. 2 показаны результаты, полученные для двух СКМ; очевидно, что преимущество имеет композиция хромель-алюмель (рис. 2, а), у которой кривые монотонны.

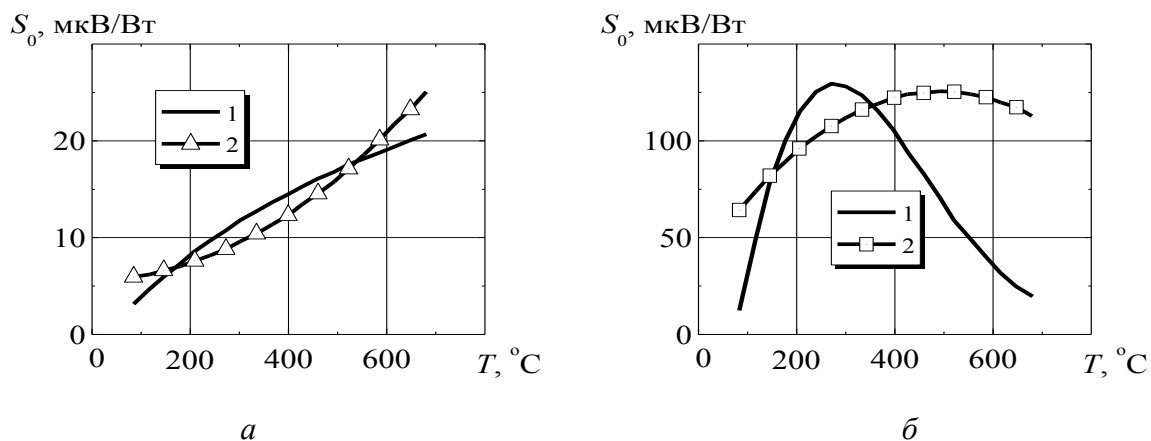


Рис. 2. Предварительные оценки вольт-ваттной чувствительности датчиков из композиций: *а* – хромель-алюмель; *б* – никель-сталь 12Х18Н9Т; цифрами обозначены: 1 – результаты расчета; 2 – экспериментальные кривые

Однако особый интерес вызывает применение композиций полупроводник-металл и полупроводник-проводник, поскольку значения коэффициентов термоЭДС у полупроводников на порядок и более превышают уровень, характерный для металлов.

Способом диффузионной сварки удалось получить СКМ из композиции кремний-алюминий. Растворимость алюминия в кремнии высока, что традиционно используется в цветной металлургии, сыграла положительную роль, обеспечив диффузионное соединение с образованием переходной зоны шириной 5...15 мкм [4, 5].

В рамках теплофизического эксперимента интересно создать ГДТП, проницаемые для потока газа или жидкости; такие датчики позволят, например, исследовать теплообмен в системах с вдувом охлаждаемой среды.

В качестве слоев были использованы проницаемые материалы: волокнистые, сетчатые, с регулярной перфорацией и т. д. На рис. 3 показана структура композиции сталь 12Х18Н9Т (сетка) – никель. При диффузионной сварке пересечения нитей сетки свариваются в зонах контакта, а после разрезки датчик становится проницаемым для потоков жидкости или газа, причем сопротивление не превышает десятков Па/мм (и может регулироваться подбором сетки, углом наклона  $\theta$  и толщины пластины). Толкование сигнала такого ГДТП представляет отдельную задачу, но его применение в исследованиях систем вдува, газовых завес и т. д. дает явные и не имеющие аналогов преимущества.

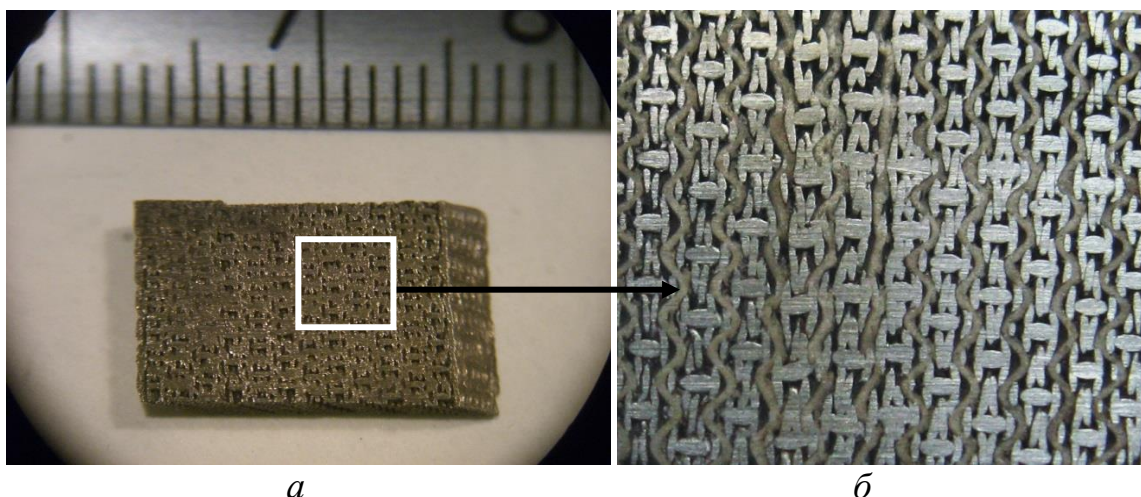


Рис. 3. Образец (а) и микроструктура композиции (б) сталь 12Х18Н9Т (сетка) – никель; шкала слева, в мм

Опыт применения высокотемпературных ГДТП, выполненных на основе СКМ, дает существенно новые возможности и повышает информативность теплофизического эксперимента. Дальнейшие работы в этой области должны сделать ГДТП стандартным измерительным средством, сопоставимым по применяемости с термопарами и термометром сопротивления.

### Список литературы

1. Дивин Н. П. Датчик теплового потока. Свидетельство на полезную модель № 9959 с приоритетом от 10.08.1998 г. Российское агентство по патентам и товарным знакам. 16.05.99. Бюл. «Полезные модели». № 5.
2. Геращенко О. А. Основы теплотрии / О. А. Геращенко. Киев: Наукова думка, 1971. – 192 с.
3. Geiling L. Das Thermoelement als Strahlungsmesser / L. Geiling // Zschr. F. Angew. Phys., 1951. Bd. 3.12.
4. Сапожников С. З. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 202 с.
5. Барабанова О. А. Диффузионная сварка в градиентной теплотрии / О. А. Барабанова, С. В. Набатчиков, С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков // Технология машиностроения. 2012. № 8. С. 42–45.